第 41 卷 第 2 期
2024 年 4 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 41 No. 2
Apr. 2024

文章编号:1000-4939(2024)02-0363-09

骨料粒径对混凝土Ⅰ型断裂裂缝扩展影响研究

陈徐东[1],吴朝国[1],黄业博[1],张伟[2],李升涛[1]

(1. 河海大学土木与交通学院,210098 南京;2. 扬州水利局,225000 扬州)

摘 要:为研究不同骨料粒径混凝土Ⅰ型断裂裂缝扩展特性,开展了骨料粒径为 10、20、30、40 mm 的混凝土三点弯曲梁断裂试验;结合数字图像相关技术(digital image correlation,DIC)测得试件表面计算区域全场位移变化数据;对不同骨料粒径混凝土断裂能、断裂韧度、断裂过程区(fracture process zones,FPZ)变化和发展进行研究,探讨了 FPZ 扩展过程与峰后荷载之间的关系。结果表明:随着骨料粒径增大,试件峰值荷载和断裂参数均呈现先增大后减小的趋势,M20 试件 FPZ 长度的变化与峰后荷载的变化有很强的关联性,其骨料对微裂缝扩展的约束效果最好;此外,通过分析不同骨料粒径混凝土试件 FPZ 的发展规律,可知,骨料粒径为 20 mm 的混凝土试件,其峰后局部变形能力得到了改善,断裂能及断裂韧度得到了提高,在断裂过程中具有比其他骨料粒径混凝土更高的承载力和更小的 FPZ,因此,合适的骨料粒径为 20 mm。

关键词:断裂;骨料粒径;数字图像相关;断裂过程区

中图分类号:TU504 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2024.02.010

Influence of aggregate size on the propagation of concrete type Ⅰ fracture cracks

CHEN Xudong[1],WU Chaoguo[1],HUANG Yebo[1],ZHANG Wei[2],LI Shengtao[1]

(1. School of Civil Engineering and Transportation,Hohai University,210098 Nanjing,China;
2. Yangzhou Water Conservancy Bureau,225000 Yangzhou,China)

Abstract:In order to study the propagation characteristics of type Ⅰ fractures of concrete with different aggregate sizes,concrete three-point bending beam fracture tests with the maximum aggregate size of 10, 20,30,40 mm were carried out,and the data of full-field strain and displacement changes in the calculated area on the specimen surface were measured by using digital image correlation techniques to investigate the changes and development of fracture energy,fracture toughness and fracture process zone of concrete with different aggregate sizes. The relationship between the FPZ extension process and the post-peak loading was investigated. The results show that with the increase of the aggregate size,the compressive strength, peak load and fracture parameters of the specimens show a trend of increasing first and then decreasing, and the change of FPZ length of M20 specimens has a strong correlation with post-peak load,and the

收稿日期:2022-01-08 **修回日期**:2022-06-03

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2021YFB2600200);国家自然科学基金资助项目(No. 51979090);国家重点实验室开放基金资助项目(No. 2019CEM002)

通信作者:陈徐东,教授。E-mail:cxdong1985@163.com

引用格式:陈徐东,吴朝国,黄业博,等. 骨料粒径对混凝土Ⅰ型断裂裂缝扩展影响研究[J]. 应用力学学报,2024,41(2):363-371.
CHEN Xudong,WU Chaoguo,HUANG Yebo,et al. Influence of aggregate size on the propagation of concrete type Ⅰ fracture cracks[J]. Chinese journal of applied mechanics,2024,41(2):363-371.

aggregate has the best restraint effect on microcracks, In addition, by analyzing the development law of FPZ of concrete specimens with different aggregate sizes, it can be learned that specimens with the aggregate size of 20 mm have an improved local deformation capacity after peaking, enhanced fracture energy and fracture toughness, higher bearing capacity and smaller FPZ in the fracture process than other aggregate sizes concrete; therefore, the suitable aggregate size is 20 mm.

Key words: fracture; aggregate size; digital image correlation; fracture process zone

混凝土是一种典型的非均质材料，由骨料、砂浆、界面过渡区和孔洞组成，具有非常独特的物理和力学特性，在工程上应用非常广泛[1-4]，混凝土中骨料的体积往往能达到总体积的60% ~80%[5-6]。因此，骨料的粒径、体积分数、类型等性质对混凝土性能有着重要影响[7-13]。

对于普通混凝土，唐海玥等[14]发现，骨料粒径较大会导致混凝土抗压、抗折强度不足；ELICES等[15]认为随着粗骨料粒径增加，混凝土抗拉强度逐渐减小；王江波等[16]认为不同骨料粒径混凝土抗压强度总是小于其对应砂浆试件，且随着粗骨料粒径增大呈现出先增大后减小的趋势；李树山等[17]通过采用3组不同比表面积粗骨料进行试验，发现粗骨料粒径越大，混凝土抗压强度越小，粗骨料粒径对混凝土抗压强度的影响程度还与水灰比有关，水灰比越小，粗骨料粒径效应越显著；杜敏等[18]发现，随着粗骨料粒径增大，混凝土试件弯拉强度逐渐减小。骨料粒径除了影响混凝土力学性能，对断裂性能的影响也不容忽略。张廷毅等[19]利用骨料粒径分别为10、20 mm的混凝土试件和基体砂浆试件进行三点弯曲断裂试验，发现混凝土断裂韧度随骨料粒径增大而增大；陈京钰[20]利用骨料粒径为10、20、30、40 mm的混凝土试件进行三点弯曲断裂试验，结果表明，断裂韧度和断裂能随着骨料粒径增大先增大后减小。综上可知，目前的研究大都围绕力学性能、断裂参数等因素展开，对不同骨料粒径对普通混凝土Ⅰ型断裂裂缝扩展影响研究较少。

数字图像相关技术（digital image correlation, DIC）是一种从材料表面散斑图像中获取应变信息的光学测量技术。作为研究混凝土断裂过程的一种有效技术手段，该方法已在混凝土断裂试验中得到广泛应用[21-22]。DIC技术具有较高的准确性[23]，通过DIC技术能有效确定断裂过程区（fracture process zones, FPZ）发展[24]。现有研究结果表明[25-26]，骨料粒径决定断裂过程区的扩展宽度，断裂过程区的性质会受到断裂能和断裂韧度这两个断裂参数的影响。目前，关于不同骨料粒径对普通混凝土Ⅰ型断裂裂缝扩展长度的影响研究相对较少。因此通过开展三点弯曲断裂试验，结合DIC技术，实时观测混凝土试件在加载过程中的位移变化；对不同骨料粒径混凝土FPZ扩展规律进行研究，对不同骨料粒径混凝土的Ⅰ型断裂裂缝扩展研究具有参考价值。

1 试验方案

1.1 原材料及配合比

试验所用胶凝材料为P·O 42.5级普通硅酸盐水泥和Ⅰ级粉煤灰；粗骨料为连续级配石灰石质碎石，颗粒级配粒径分别为5 ~10、5 ~20、5 ~30、5 ~40 mm；细骨料为天然河砂，细度模数为2.56；外加剂为聚羧酸高效减水剂。混凝土配合比为：水泥∶粉煤灰∶碎石∶砂∶水∶减水剂 =358∶90∶1 210∶919.4∶177∶4.31。

试验采用骨料粒径为10、20、30、40 mm的4种混凝土试件，分别编号为M10、M20、M30、M40；断裂试验试件尺寸为1 100 mm×250 mm×150 mm，如图1所示，试件跨中有一宽度为2 mm的初始裂缝，初始裂缝长度 a_0 =100 mm。另外采用标准立方体试件测定抗压强度，标养28 d之后，测得4种骨料粒径混凝土平均抗压强度分别为45.56、46.13、45.15、38.43 MPa。

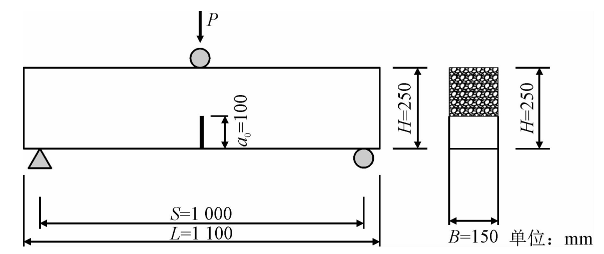


图1 断裂试验试件尺寸

Fig.1 Fracture test specimen size

1.2 试验方法

DIC是一种无损光学监测技术，通过对试件表面灰度数字图像进行采集。对比其在不同时间的图像变化进行分析计算，达到监测试件表面变形与位

移的目的,可将被摄面的变形可视化,进而得到试件表面整个计算区域的应变、位移数据。根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)的要求,使用 SANS 试验机测试抗压强度和劈裂抗拉强度。通过开展不同骨料粒径三点弯曲梁的单调加载断裂试验获得断裂参数,试验由初始裂缝口张开位移(crack mouth opening displacement,CMOD)控制加载;以固定的 CMOD 增长速率(0.005 mm/s)单调加载至破坏,试验装置如图 2 所示。每组试验采用 3 个试件,并对所得试验数据取算数平均值作为最终的试验结果。



图 2　三点弯曲断裂试验装置

Fig. 2　Three-point bending fracture test device

2　试验结果与分析

2.1　荷载-位移曲线分析

不同骨料粒径混凝土试件载荷-裂缝口张开位移(P-CMOD)曲线如图 3 所示,可以看出,随着骨料粒径增大,峰值荷载 P_0 先增大后减小。M10 试件抗弯承载力最小,M20 试件抗弯承载力最大,M30 试件接近 M20 试件,其次是 M40 试件。

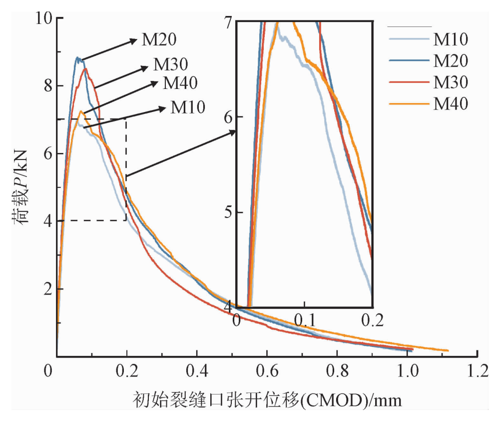


图 3　不同骨料粒径试件 P-CMOD 曲线图

Fig. 3　P-CMOD curve diagram of specimens with different aggregate sizes

当荷载达到峰值之后,M10 试件峰后荷载下降较其他试件更快,这可以从图中放大区域看出,但后期下降幅度减弱,和 M20 试件一样平缓,而 M30 试件的曲线尾部相对更陡一些,这种现象和其它混凝土试件相比更为明显,M40 试件峰后荷载下降较缓慢。

2.2　断裂参数计算

断裂韧度 K_{IC} 是描述混凝土抵抗宏观裂缝扩展能力的一个断裂参数。采用《水工混凝土断裂试验规程》(DL/T 5332—2005)[27] 中的计算方法,即

$$E = \frac{6Sa_0}{C_i BH^2} V(\alpha_0) \tag{1}$$

$$V(a_0) = 0.76 - 2.28a_0 + 3.87a_0^2 - 2.04a_0^3 + \frac{0.66}{(1-a_0)^2} \tag{2}$$

$$a_c = \frac{2}{\pi}(H + h_0) \times \arctan\sqrt{\frac{BED_{CMOD}^{C}}{32.6F_{max}} - 0.1135} - h_0 \tag{3}$$

$$f(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha(1-\alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}} \tag{4}$$

$$K_{IC} = \frac{1.5\left(F_{max} + \frac{mg}{2} \times 10^{-2}\right) \times 10^{-3} S\sqrt{a_c}}{BH^2} \tag{5}$$

式中:F_{max} 是峰值荷载;m 是试件支座间的质量,用试件总质量按 S/L 比折算;g 是重力加速度;S 是试件两支座间跨度;L 是混凝土试件梁长度;a_c 是临界有效裂缝长度;h_0 是夹式引伸计刀口薄钢板厚度;B 是试件厚度;H 是试件高度;E 是计算弹性模量;D_{CMOD}^{C} 是裂缝口张开位移临界值;a_0 是初始裂缝长度;C_i 是由试件 P-CMOD 曲线段上 D_{CMOD} 为 0 ~ 0.01 mm 的直线段上任一点的 D_{CMOD}、P 计算的斜率。

断裂能 G_f 是用来衡量混凝土抵抗裂缝扩展能力的一个断裂参数。采用 JCI-S-001e2003[28] 的计算方法对 $D_{CMOD} = 0.6$ mm 时平均断裂能 G_f 进行求解,即

$$G_f = \frac{0.75W_0 + 0.75\left(\frac{S}{L}m_1 + 2m_2\right)gD_{CMOD}}{A_{lig}} \tag{6}$$

式中:W_0 是 P-CMOD 曲线 D_{CMOD} 值在 0 ~ 0.6 mm 之间曲线所包围面积;m_1 是混凝土试件梁质量;m_2 是混凝土试件梁上方加载支座质量;A_{lig} 是混凝土试件梁断裂带面积,即初始裂缝上部有效截面面积。

FPZ与断裂韧度(K_{IC})和断裂能(G_f)密切相关。断裂参数计算结果如表1所示。可以看出,随着骨料粒径增大,断裂韧度和断裂能先增大后减小。当骨料粒径为20 mm时,断裂韧度、断裂能最大,断裂韧度为3.033 MPa·$m^{1/2}$,断裂能为94.18 N/m,相较于M10试件分别增加了35%和13%;M40试件断裂韧度为2.508 MPa·$m^{1/2}$,断裂能为88.58 N/m,相较于M20试件分别减小了17%和6%,随着骨料粒径增大,断裂韧度和断裂能先增大后减小[29]。

表1 不同骨料粒径混凝土试件断裂参数

Tab.1 Fracture parameters of concrete specimens with different aggregate sizes

试件编号	C_i/(mm·N^{-1})	E/GPa	F_{max}/kN	a_c/m	K_{IC}/(MPa·$m^{1/2}$)	K_{IC}平均值/(MPa·$m^{1/2}$)	G_f/(N·m^{-1})	G_f平均值/(N·m^{-1})
M10-1	5.08	12.55	6.97	0.131	2.330	2.247	85.33	83.71
M10-1	5.64	11.30	6.94	0.125	2.266		82.91	
M10-1	6.46	9.87	6.74	0.119	2.144		82.88	
M20-1	3.83	16.64	8.84	0.140	3.038	3.033	93.29	94.18
M20-2	3.59	17.75	8.75	0.144	3.051		95.59	
M20-3	3.67	17.37	8.65	0.143	3.012		93.65	
M30-1	3.73	17.09	8.50	0.142	2.946	2.911	90.37	89.45
M30-2	4.03	15.81	8.42	0.138	2.881		89.71	
M30-3	3.88	16.43	8.44	0.140	2.908		88.27	
M40-1	4.24	15.03	7.25	0.150	2.611	2.508	90.69	88.58
M40-2	5.01	12.72	7.13	0.143	2.503		88.27	
M40-3	5.13	12.42	6.83	0.144	2.411		86.79	

骨料在混凝土中承担着传递应力的角色,对于普通混凝土,同时存在骨料增强作用与骨料表面微裂缝对于强度的不利作用,且均随骨料粒径的增大而增大[30]。当两者作用效果相等时,此时的骨料粒径为一个临界值,当骨料粒径在临界值以下时,断裂参数与骨料粒径之间表现为正相关;当骨料粒径超过临界值之后,为负相关[20]。当骨料粒径为10 mm时,骨料比表面积最大,骨料单位面积获得的水泥浆较少,没有足够的能力抵抗微裂缝的扩展[31]。相比于骨料粒径为10 mm时,20 mm时骨料比表面积减少,骨料对微裂缝扩展的约束增强;当骨料粒径为30、40 mm时,分布在骨料表面的大量微裂缝在荷载的作用下更容易沿着骨料砂浆界面扩展,最终发展成宏观裂缝[20]。因此,骨料粒径为20 mm时断裂韧度、断裂能最大,抵抗断裂的能力最强。

2.3 FPZ长度的确定

FPZ是有初始裂缝的混凝土试件在承受外荷载时,存在于初始裂缝尖端的一个应力集中区。虽然在这个应力集中区出现了大量微裂缝,但骨料和砂浆之间还存在相互作用,使得FPZ仍然能够传递部分应力。通过DIC软件可以得到计算区域内每个计算点在不同荷载时刻的位移值,根据位移场数据,并从中提取对应边界点的位移,主要包括试件刚体位移和生成裂缝形成的位移;若某个位置的两个边界点水平位移值相减结果趋近于零,将该位置作为FPZ终点[32]。最初的FPZ起点为初始裂缝尖端,随着荷载不断增加,混凝土试件FPZ长度逐渐增大,初始裂缝尖端张开位移(crack tip opening displacement,CTOD)也随之增加。当D_{CTOD}超过临界值w_0时,混凝土初始裂缝尖端处的微裂缝会发展形成宏观裂缝,并逐渐扩展;FPZ起点将会向上移动,确定好终点和起点,便可确定FPZ长度。

对w_0进行求解,求解公式为[33]

$$w_0 = \frac{3.6G_f}{f_t} \tag{7}$$

式中:G_f为断裂能(N/mm);f_t为抗拉强度(N/mm^2)。

如图4所示,图中为DIC拍摄区域,虚线框以内为计算区域。在计算区域内,沿X和Y方向每隔5个像素点选取一个计算点,如计算区域内M_1N_1、M_2N_2等均平行于MN线;通过DIC软件可以得到计算区域内各个计算点在不同荷载时刻的位移值。图

5 为 MN 线上所有计算点位移值分布图。当荷载达到 50% P_0 时,MN 线上计算点位移值分布基本上是一条水平直线,各个计算点位移值波动较小,试件变形较小,还处于弹性阶段;当荷载达到 P_0 时,MN 线上计算点位移值波动明显增大,主要分布在 −16 μm 到 17 μm 之间;同时可以观察到 O 点附近两个计算点 A 和 B 之间的位移值出现了跳跃现象,此时初始裂缝尖端已经有微裂缝产生,FPZ 已经形成,计算点 A 和 B 之间的位移差值即 MN 线上 FPZ 内微裂缝张开位移;当荷载下降至 80% P_0 时,位移差值进一步增大;当荷载下降至 40% P_0 时,微裂缝张开位移已经增大至 169 μm(M10)、128 μm(M20)、148 μm(M30)、186 μm(M40)。在相同荷载作用下,M20 试件微裂缝张开位移值相对较小,这是由于 M20 试件通过本身变形吸收了一部分能量,能很好地约束微裂缝发展,断裂能较大;而 M10 试件骨料粒径较小,对微裂缝约束效果有限,断裂能也较小;M30 试件骨料虽然能约束裂缝发展,但是骨料砂浆界面上较多的微裂缝会加快裂缝的发展,因此其断裂能较 M20 试件有所下降;M40 试件骨料粒径太大,骨料砂浆界面上微裂缝较多[29],导致其微裂缝张开位移值最大。这与前一节断裂能、断裂韧度的计算结果相对应。

表 2　不同骨料粒径混凝土试件的 w_0

Tab. 2　w_0 of concrete specimens with different aggregate sizes

试件编号	G_f/(N·mm^{-1})	f_t/(N·mm^{-2})	w_0/mm
M10	0.083 71	2.68	0.112
M20	0.094 18	2.65	0.128
M30	0.089 45	2.59	0.124
M40	0.088 58	2.21	0.144

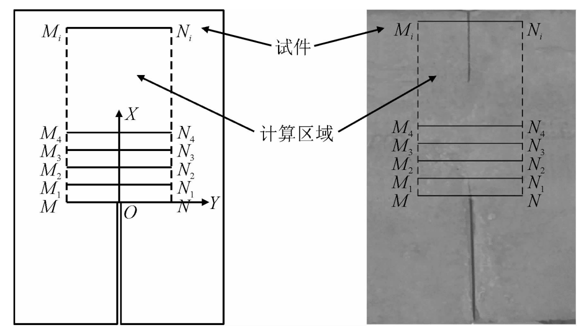


图 4　试件计算区域 MN 线

Fig. 4　MN line of the specimen calculation area

(a) M10

(b) M20

(c) M30

(d) M40

图 5　MN 线上计算点在不同荷载时刻的位移值分布图

Fig. 5　Distribution of displacement values of calculated points on MN line at different loading moments

2.4 FPZ 扩展规律

通过 DIC 软件分析计算得出裂缝张开宽度沿试件高度的分布规律,如图 6 所示。FPZ 发展到一定程度之后,曲线斜率显著减小,如图 6 中 P_7、P_8荷载时刻。这和 P-CMOD 曲线峰后软化两阶段相对应,即微裂缝发展阶段(急速下降阶段)和骨料与砂浆材料之间相互作用阶段(平缓下降阶段)。以 M20 试件为例分析,如图 6(b),当 $P_5 \to P_6 \to P_7 \to P_8$时,宏观裂缝长度从 0 mm→19.6 mm→81.07 mm→89.99 mm;宏观裂缝长度在 $P_7 \to P_8$阶段增长较缓慢,$P_6 \to P_7$阶段是主要增长阶段。

如图 6(b),FPZ 在 P_5时扩展最充分,并达到最大扩展长度 112.84 mm;当荷载下降至 P_6时,D_{CTOD}为 0.147 mm,大于 w_0(0.128 mm),FPZ 起点向上移动。和 P_5时相比,FPZ 终点在 P_6时只向上扩展了 13.37 mm,FPZ 起点却向上缩短了 19.6 mm,PFZ 总长度减小到 106.61 mm;当荷载下降至 P_7时,此时 D_{CTOD}为 0.338 mm,和 P_5时相比,FPZ 终点向上扩展了 21.64 mm,FPZ 起点向上缩短了 81.07 mm,FPZ 总长度减小到 53.41 mm;当荷载下降至 P_8时,此时 D_{CTOD}为 0.390 mm,和 P_5时相比,FPZ 终点向上扩展了 27.94 mm,FPZ 起点向上缩短了 89.99 mm,FPZ 总长度减小到 50.79 mm。由此可见,当 FPZ 扩展到最大长度时,由于试件剩余有效区域对裂缝的约束作用,使得 FPZ 终点向上扩展的长度远小于其起点向上缩短的长度。故 FPZ 长度会先上升,后下降,其它试件具有相似规律。

(a) M10

(b) M20

(c) M30

(d) M40

图 6 不同骨料粒径混凝土典型荷载时刻 FPZ 长度测定

Fig. 6 Determination of FPZ length at typical loading moments for concrete with different aggregate sizes

为研究 FPZ 长度在整个扩展过程中的变化规律,绘制出 FPZ 长度随有效裂缝长度变化趋势图,如图 7 所示。当荷载为 P_1时,M10 试件 FPZ 长度最小;荷载增加至 P_2时,M10 试件骨料对微裂缝的约束减弱,FPZ 长度增大;荷载增加至 P_3时,M20 试件增幅最小;荷载从 P_3下降至 P_5、P_6(M30)时,FPZ 长度快速增长,直到 D_{CTOD}达到临界值 w_0;M10、M20、M30、M40 试件 FPZ 长度分别在 54.8% P_0、45.3% P_0、48.1% P_0、53.6% P_0时达到最大值。随着荷载继续下降,当 D_{CTOD}超过临界值 w_0时,初始裂缝尖端形成宏观裂缝,FPZ 向上移动,长度随荷载的降低而减小。其中 M10、M30 试件减小幅度最大,其宏观裂缝

长度增长幅度也最大，试件承载力急剧下降，这与 *P*-CMOD 曲线峰后荷载急速下降相对应；而 M40 试件 FPZ 减小幅度较稳定，这与 *P*-CMOD 曲线峰后荷载平缓下降相对应；M20 试件 FPZ 减小过程可以分为 3 个阶段：Ⅰ阶段，FPZ 长度减小幅度很小，FPZ 起点向上缩短较少，宏观裂缝长度变化较小，这说明 20 mm 骨料粒径对裂缝扩展有很好的约束作用；Ⅱ阶段，FPZ 长度减小幅度增大，此时 FPZ 起点向上缩短较多，相比于Ⅰ阶段，宏观裂缝的长度增长了 3 倍；Ⅲ阶段，FPZ 长度减小幅度得到了控制，FPZ 起点向上缩短较少，宏观裂缝的长度变化较小。由此可以看出试件 M20 裂缝扩展最慢，抵抗裂缝的能力最强，对于裂缝扩展的约束最好。

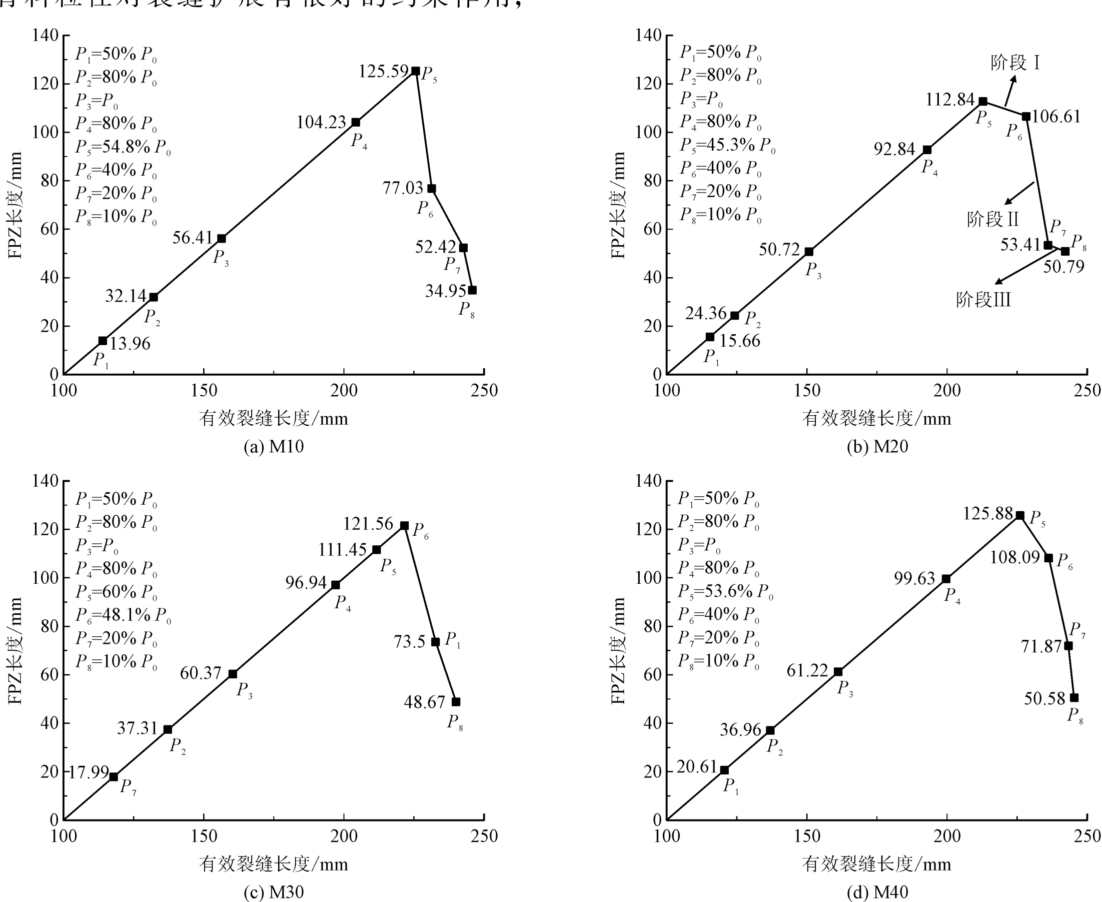


图 7　FPZ 长度随有效裂缝长度变化趋势图

Fig. 7　The trend of FPZ length with effective crack length

3　结　论

1）普通混凝土试件梁峰值荷载和断裂参数与骨料粒径有关。随着骨料粒径增大，峰值荷载、断裂能和断裂韧度先增大后减小，20 mm 时最优；结合试验结果，普通混凝土合适的骨料粒径为 20 mm，此时普通混凝土拥有优良的力学性能。

2）在同样荷载作用下，随着骨料粒径增大，*MN* 线上裂缝张开位移值先减小后增大，20 mm 时最小。不同骨料粒径对微裂缝形成扩展具有很大影响；与 20 mm 骨料相比，10 mm 和 40 mm 骨料的不良影响更大，微裂缝扩展速度更大，微裂缝张开位移更大。

3）在整个加载过程中，FPZ 长度先增大后减小。不同骨料粒径对 FPZ 扩展有很大影响，随着骨料粒径增大，FPZ 长度先减小后增大；FPZ 扩展完整的荷载时刻越晚，其承载力、变形能力越强；同时，M20 试件前期 FPZ 扩展较缓慢，FPZ 长度最小，断裂能、断裂韧度最大。因此，其抵抗裂缝的能力最强，拥有更高的承载力。

4）M20 试件 *P*-CMOD 曲线峰后荷载下降趋势和 FPZ 长度减小有很强的关联性。FPZ 扩展完整之后，FPZ 减小过程可分为 3 个阶段：Ⅰ阶段，FPZ 缓慢减小；Ⅱ阶段，FPZ 突然快速减小，对应 *P*-CMOD 曲线上一处荷载突降；Ⅲ阶段，FPZ 减小趋势得到了有效控制，骨料起到了很好的约束作用。骨料约束

效果在骨料粒径为20 mm时最佳。

参考文献:

[1] 陈燕伟,冯吉利,朱天宇,等.不同骨料体积分数下混凝土增韧机制及细观断裂模拟[J].复合材料学报,2022,39(10):4972-4987.
CHEN Yanwei, FENG Jili, ZHU Tianyu, et al. Toughening mechanism and meso-scale fracture simulation of concrete with different aggregate volume fractions[J]. Acta materiae compositae Sinica,2022,39(10):4972-4987(in Chinese).

[2] 陆瀛鹏,高洪波,徐世烺,等.长期恒荷载作用下混凝土断裂过程的时变特性[J].水力发电学报,2021,40(7):141-151.
LU Yingpeng, GAO Hongbo, XU Shilang, et al. Time-dependent characteristics of concrete fracture process under long-term constant loads[J]. Journal of hydroelectric engineering,2021,40(7):141-151(in Chinese).

[3] SUNG W P,TUNG S H,SHIH M H. Identification of the landslide using the satellite images and the digital image correlation method [J]. Disaster advances,2013,6(4):4-9.

[4] 米正祥,胡昱,李庆斌.大坝混凝土断裂强度及其确定方法[J].水力发电学报,2019,38(6):19-28.
MI Zhengxiang, HU Yu, LI Qingbin. Fracture strength of dam concrete and its determination method[J]. Journal of hydroelectric engineering,2019,38(6):19-28(in Chinese).

[5] CHEN B,LIU J Y. Effect of aggregate on the fracture behavior of high strength concrete[J]. Construction and building materials, 2004,18(8):585-590.

[6] 金浏,杨旺贤,余文轩,等.骨料粒径对混凝土动态拉伸强度及尺寸效应影响分析[J].振动与冲击,2020,39(9):24-34.
JIN Liu, YANG Wangxian, YU Wenxuan, et al. Influence of aggrecate size on the dynamic tensile strength and size effect of concrete[J]. Journal of vibration and shock,2020,39(9):24-34 (in Chinese).

[7] 杜晓奇,司政,黄灵芝,等.粗骨料颗粒形态和体积分数对混凝土单轴压缩性能的影响研究[J].应用力学学报,2020,37(4):1828-1834.
DU Xiaoqi, SI Zheng, HUANG Lingzhi, et al. Study on the influence of coarse aggregate particle shape and volume fraction on the uniaxial compressive properties of concrete[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(4):1828-1834(in Chinese).

[8] AKCAY B, AGAR-OZBEK A S, BAYRAMOV F, et al. Interpretation of aggregate volume fraction effects on fracture behavior of concrete[J]. Construction and building materials, 2012,28(1):437-443.

[9] 陈燕伟,冯吉利,李凤晨,等.粗骨料体积分数对混凝土Ⅱ型断裂参数的影响[J].复合材料学报,2021,38(11):3939-3949.
CHEN Yanwei, FENG Jili, LI Fengchen, et al. Mode Ⅱ fracture parameters of concrete with different coarse aggregate volume fractions[J]. Acta materiae compositae Sinica,2021,38(11): 3939-3949(in Chinese).

[10] BEYGI M H A,KAZEMI M T,NIKBIN I M,et al. The influence of coarse aggregate size and volume on the fracture behavior and brittleness of self-compacting concrete[J]. Cement and concrete research,2014,66:75-90.

[11] ALYHYA W S,ABO DHAHEER M S,AL-RUBAYE M M,et al. Influence of mix composition and strength on the fracture properties of self-compacting concrete [J]. Construction and building materials,2016,110:312-322.

[12] 潘慧敏,左建航,宋嵘杰.粗骨料最大粒径对混凝土受早期扰动后力学性能的影响[J].硅酸盐通报,2020,39(10):3131-3136.
PAN Huimin,ZUO Jianhang,SONG Rongjie. Influence of maximum size of coarse aggregate on mechanical properties of concrete disturbed in early stage [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2020,39(10):3131-3136(in Chinese).

[13] 阮征,陈力,洪建,等.骨料和砂浆等影响混凝土强度的细观层次机理分析[J].建筑材料学报,2014,17(6):952-958.
RUAN Zheng,CHEN Li,HONG Jian,et al. Mesoscopic analysis on the mechanism of effects of aggregate and mortar on concrete strength[J]. Journal of building materials,2014,17(6):952-958 (in Chinese).

[14] 唐海玥,闫纾梅.不同骨料粒径对透水混凝土性能影响研究[J].公路工程,2020,45(4):193-196.
TANG Haiyue,YAN Shumei. Research on the influence of different aggregate particle size on the performance of permeable concrete [J]. Highway engineering,2020,45(4):193-196(in Chinese).

[15] ELICES M,ROCCO C G. Effect of aggregate size on the fracture and mechanical properties of a simple concrete[J]. Engineering fracture mechanics,2008,75(13):3839-3851.

[16] 王江波,张天星,丁俊升,等.骨料粒径对混凝土力学性能影响研究[J].北京理工大学学报,2021,41(11):1162-1170.
WANG Jiangbo,ZHANG Tianxing,DING Junsheng,et al. Influence of aggregate size on mechanical properties of concrete[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2021,41(11): 1162-1170(in Chinese).

[17] 李树山,高丹盈.粗骨料粒径对卵石混凝土抗压强度影响的试验研究[J].混凝土,2013(2):59-61.
LI Shushan,GAO Danying. Experimental research on the influence of coarse aggregate size on boulder concrete compressive strength [J]. Concrete,2013(2):59-61(in Chinese).

[18] 杜敏,金浏,李冬,等.粗骨料粒径对混凝土弯拉强度尺寸效应影响的试验研究[J].北京工业大学学报,2016,42(6):

912-918.

DU Min, JIN Liu, LI Dong, et al. Experimental study of the influence of coarse aggregate size on the size effect of concrete flexural strength[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016,42(6):912-918(in Chinese).

[19] 张廷毅,高丹盈,郑光和,等. 三点弯曲下混凝土断裂韧度及影响因素[J]. 水利学报,2013,44(5):601-607.

ZHANG Tingyi, GAO Danying, ZHENG Guanghe, et al. Fracture toughness of concrete and influencing factors under three-point bending[J]. Journal of hydraulic engineering,2013,44(5):601-607(in Chinese).

[20] 陈京钰. 骨料粒径与纤维长度对钢纤维混凝土断裂性能影响的研究[D]. 郑州:郑州大学,2016.

[21] DAS S, AGUAYO M, SANT G, et al. Fracture process zone and tensile behavior of blended binders containing limestone powder [J]. Cement and concrete research,2015,73:51-62.

[22] 张俊,陈红鸟,王德强. 基于 DIC 技术的混凝土往复荷载下断裂力学特性研究[J]. 应用力学学报,2021,38(4):1636-1643.

ZHANG Jun, CHEN Hongniao, WANG Deqiang. Study on fracture properties of concrete under cyclic loading by using DIC technique [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021, 38(4): 1636-1643(in Chinese).

[23] 张朝阳,孔祥明,卢子臣. 用数字图像相关法研究聚合物改性砂浆的力学性能[J]. 硅酸盐学报,2018,46(2):187-192.

ZHANG Chaoyang, KONG Xiangming, LU Zichen. Application of digital image correlation method in mechanical properties test of polymer modified mortar [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2018,46(2):187-192(in Chinese).

[24] WU Z M, RONG H, ZHENG J J, et al. An experimental investigation on the FPZ properties in concrete using digital image correlation technique[J]. Engineering fracture mechanics,2011,78(17):2978-2990.

[25] 赵伏军,陈珂,王宏宇,等. 动静组合载荷破岩声发射理论分析及数值试验[C]//第十二届全国岩石破碎工程学术大会论文集. 沈阳:中国岩土力学与工程学会,2014:263-267.

[26] BUYUKOZTURK O, CONNOR J J, LEOMBRUNI P. Research on modeling shear transfer in reinforced concrete nuclear structures [J]. Nuclear engineering and design,1980,59(1):67-83.

[27] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水工混凝土断裂试验规程:DL/T 5332—2005[S]. 北京:中国电力出版社,2005.

[28] Japan Concrete Institute. Method of test for fracture energy of concrete by use of notched beam: JCI-S-001e2003 [S]. Tokyo: Japan Concrete Institute,2003.

[29] 赵志方,饶俊波,王卫仑,等. 粗骨料粒径和水胶比对大坝混凝土断裂参数的影响[J]. 浙江工业大学学报,2015,43(3):270-274.

ZHAO Zhifang, RAO Junbo, WANG Weilun, et al. Influence of coarse aggregate size and water-to-binder ratio on fracture parameters of dam concrete[J]. Journal of Zhejiang University of Technology,2015,43(3):270-274(in Chinese).

[30] 吕从聪,卢晓春,熊勃勃,等. 骨料-界面裂纹相互作用对混凝土开裂强度的影响[J]. 应用力学学报,2021,38(6):2329-2337.

LÜ Congcong, LU Xiaochun, XIONG Bobo, et al. Effect of aggregate-interface crack interaction on cracking strength of concrete[J]. Chinese journal of applied mechanics,2021,38(6): 2329-2337(in Chinese).

[31] 王宝媛,刘秀杰,纪海军,等. 粗骨料最大粒径对混凝土性能影响的试验研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版),2012,13(4):13-14.

WANG Baoyuan, LIU Xiujie, JI Haijun, et al. Experimental study on the influence of maximum size coarse aggregate to concrete properties [J]. Journal of Changchun Institute of Technology (natural sciences edition),2012,13(4):13-14(in Chinese).

[32] 罗翔. 含 U 型切槽混凝土梁断裂特性的研究[D]. 南昌:华东交通大学,2019.

[33] PETERSSON P E. Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials [D]. Lund: Lund University,1981.

（编辑　吕茵）